

# 特定结构振源振动时流体表面波的定向吸引作用

杨虹<sup>1,2</sup>, 彭世镠<sup>3</sup>, 毛东风<sup>2</sup>, 马余全<sup>1</sup>, 曾双雄<sup>1</sup>, 宋昀轩<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学理学院; 2. 中国石油大学(北京)国家安全生产监督管理总局油气安全工程技术研究中心; 3. 中国科学院力学所)

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05027-005-001)

**摘要:** 实验中发现三棱柱体在流体表面作低频小幅简谐振动时激发的表面波对漂浮物有定向吸引作用, 针对此现象进行了系统实验和深入研究, 分析了不同结构振源振动引起的流体表面波动的特性。开展了三棱柱体、四棱柱体、六棱柱体和圆柱体作为振源的实验。结果表明正对棱柱体棱边方向的表面波对漂浮物有吸引作用, 而正对棱柱体柱面方向的表面波对漂浮物有排斥作用。吸引作用的大小与棱角的尖锐程度呈非线性关系, 棱角越尖锐吸引作用越强。当振源为圆柱体即棱角消失时, 表面波对漂浮物没有定向吸引作用。实验发现并验证了特定结构振源振动时产生的流体表面波具有定向吸引作用, 研究成果可为水面污染物清理、海上溢油收集等工程应用问题提供帮助。图9参11

**关键词:** 海洋工程; 振源结构; 表面波动; 定向吸引; 水波动力学

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

## Directional attraction of fluid surface wave caused by vertically oscillating prisms

YANG Hong<sup>1,2</sup>, PENG Shiliu<sup>3</sup>, MAO Dongfeng<sup>2</sup>, MA Yuquan<sup>1</sup>, ZENG Shuangxiong<sup>1</sup>, SONG Yunxuan<sup>1</sup>

(1. Department of Applied Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

2. China University of Petroleum-Beijing, SAWS Oil-Gas Safety Engineering Center, Beijing 102249, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Experiments show that the surface wave, which is caused by a triangular prism performing simple harmonic vibration with low frequency and small amplitude on fluid surface, has directional force on float. A series of experiments and an in-depth study about this phenomenon were carried out, and the characteristics of fluid surface wave from different structures oscillation were analyzed. Experiments were launched with different vertical oscillating structures, such as triangular prism, quadrangular prism, hexagonal prism and the cylinder. The results show that the surface wave, on the direction directly opposite to the prism edge, can attract the floats, while the wave on the direction directly opposite to the prism facet has repelling interection. The relationship between the strength of attraction and sharpness of the angle is non-linear. The sharper the angle, the stronger the attraction force. When the prism becomes a cylinder which means without angle, the attraction will disappear. The experiment found and verified the fluid surface wave caused by specific structure oscillating prisms has directional attraction interection. The results are helpful for cleaning up pollutants and collecting spill oil on the water.

**Key words:** ocean engineering; vibration source stricture; surface wave; directed attraction; wave dynamics

## 0 引言

21 世纪是海洋经济全面发展的时代, 更好地认识海洋、认识水波的传播特性及其与接触物的相互作用, 对海洋工程(包括海洋油气工程)、海洋灾害防治、远洋运输等非常重要<sup>[1-5]</sup>。笔者在实验室做水波特性测试实验时发现不同结构振源所产生的水波存在各向异性。特别重要的是, 用三棱柱体作为振源在水面作垂向低频小幅简谐振动时, 可以将棱边所对方向的水面漂浮物拉向振源。这种“反常”现象引起笔者的高度关注, 因为通常认为振源振动会在接触介质中产生波动并把能量传播出去, 也就是漂浮物会随水波向外运

动。无独有偶, 2014 年澳洲国立大学物理学家通过特殊造波所形成的三维波浪实现了对水面物体向水波源处的牵引<sup>[6]</sup>, 但未能用目前的相关理论加以解释。这些“反常”现象, 是偶然还是必然? 如果是必然, 这种以前未被认识的定向吸引的作用机理是什么? 用经典流体力学、近代随机波理论、流固耦合方法能否给出解释? 水波的定向吸引在工程技术领域又能发挥怎样的作用? 这些都是需要关注的问题。查阅文献发现, 当前研究较多的是流体对结构物(振源)的影响, 而振源结构如何影响水波特性则是一个新的研究方向<sup>[7-11]</sup>。本文即通过设计有针对性的实验进一步研究前述“反常”现象, 分析不同结构振源对流体表面波动

特性的影响。

## 1 实验设计

为了研究不同结构振源振动引起的流体表面波动的特性,研制了一套稳定的振动发生及控制装置,包括步进电机驱动系统、垂直振动机械传动机构、不同柱状结构振源体和波动记录测量装置。

步进电机驱动系统通过控制脉冲频率精确控制步进电机转动的速度和加速度,实现振源振动频率的精确调节。系统由步进电动机及其驱动器和控制器构成,具体选择大力矩混合式两相步进电机、TC55 运动控制器和 JX-2128 驱动器。由控制器向驱动器发出脉冲信号,再由驱动器转换成步进电机所需要的强电流信号,带动步进电机运转。

垂直振动机械传动机构为曲柄连杆机构,如图 1 所示。电机带动轮盘匀速转动,通过连杆 1 带动由螺纹连接于连杆 2 底部的振源体在水池内作垂向的简谐振动。振动频率由电机控制,振幅通过改变铰链 1 和轮盘圆心之间的距离来调节。

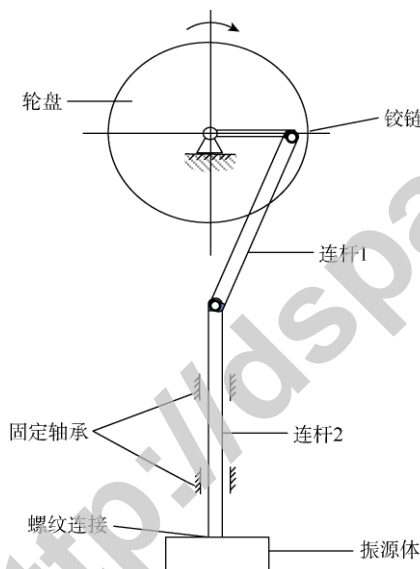


图 1 垂直振动机械传动机构示意图

选择多种刚性等边棱柱体作为振源,包括三棱柱体、四棱柱体、六棱柱体、圆柱体等(见图 2)。为了保证实验驱动力相同,每个振源体的厚度均为 40 mm,横截面积均为 5 000 mm<sup>2</sup>,均选用工业标准铝锭加工成型。

水池长、宽均为 800 mm,注水深度 500 mm。为了减少水池的边界效应,水池内壁敷以海绵薄衬。选用直径 10 mm 的塑料薄壳做浮子。首先将其置于与振

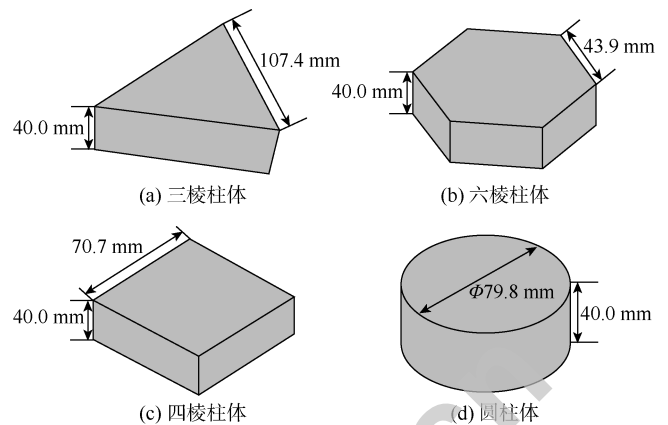


图 2 规则棱柱体振源

源质心水平距离约 100 mm 处,分别正对振源的棱边或柱面方向。然后观察不同结构振源以相同振动条件(初入水深 20 mm,振动频率 1 Hz,振幅±15 mm,垂直方向简谐振动)振动时,浮子随表面波的运动情况。

为了更好地观察、记录不同结构振源产生的流体表面波动的特性,使用摄像机对实验过程进行视频记录,并引入 TRACKER 追踪分析软件对波动过程及浮子运动情况进行分析。

## 2 实验结果及讨论

本文针对不同形状振源体振动引起的流体表面波动均进行了多次重复实验(不少于 20 次)。多次实验数据重复度相当高,表明本文设计的实验系统稳定,实验数据可靠。在每次实验时均观察到在水波传到池壁之前,无论是定向吸引还是排斥作用都已经产生,说明实验中水池的边界效应并不明显。

### 2.1 三棱柱体振源

图 3 是根据实验中拍摄的视频利用 TRACKER 软件分析得到的浮子正对三棱柱体柱面时其距振源质心距离随时间的变化曲线。随着振动开始浮子越来越远离振源,位移和时间基本呈线性关系。振源振动引起的表面波对浮子有向外的排斥作用,这与通常的认识相符。

图 4 是浮子正对三棱柱体棱边放置于水面时其距振源质心的距离随时间的变化曲线。随着振动开始,浮子不是远离振源,而是一直向着振源方向运动,越来越接近振源,在 22 s 时间内距离拉近了约 80 mm,振源对浮子产生了定向吸引。

实验中观测到三棱柱体振源引起明显的流体浅表面波动,这种波动造成的正对三棱柱体棱边和柱面的浮子的运动情况完全相反,前者使浮子被吸引,后者

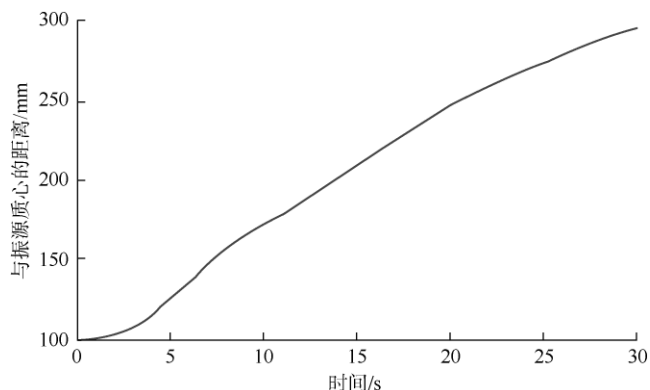


图3 浮子正对三棱柱体柱面时被排斥

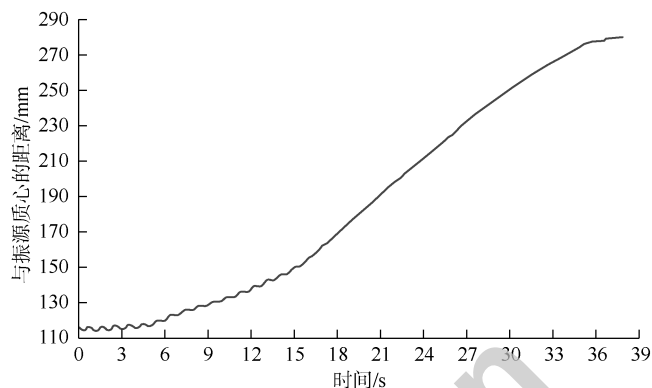


图6 浮子正对四棱柱体柱面时被排斥

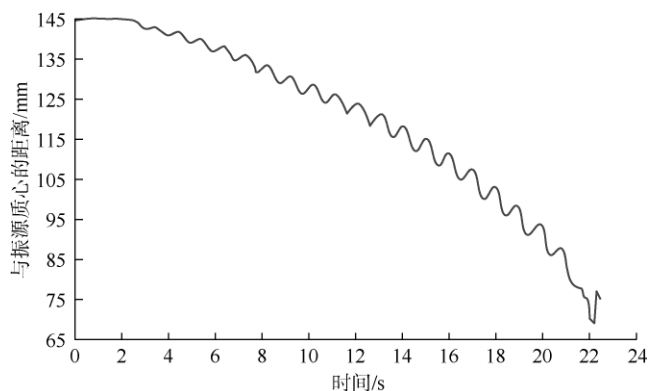


图4 浮子正对三棱柱体棱边时被吸引

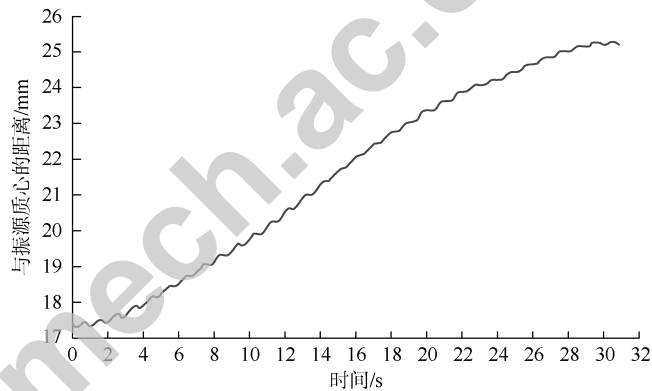


图7 浮子正对六棱柱体柱面时被排斥

使之被排斥。这表明振源棱边和柱面附近的流体表面波动特性不同。

## 2.2 四棱柱体振源

图5显示当浮子正对四棱柱体棱边放置在水面时,随着振动开始,浮子朝着振源运动,在65 s时间内距离拉近了约200 mm。

图6表明当浮子正对四棱柱体柱面放置在水面时,随着振动开始,浮子越来越远离振源。

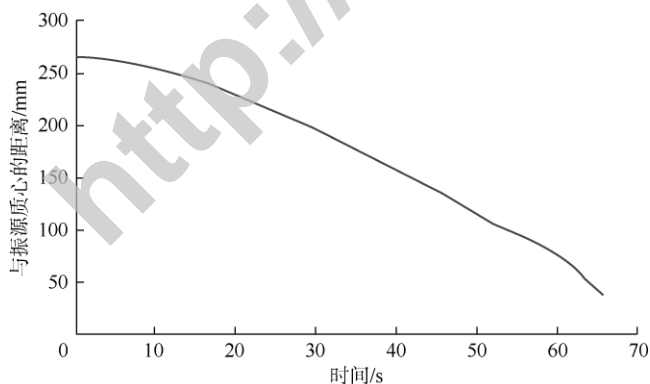


图5 浮子正对四棱柱体棱边时被吸引

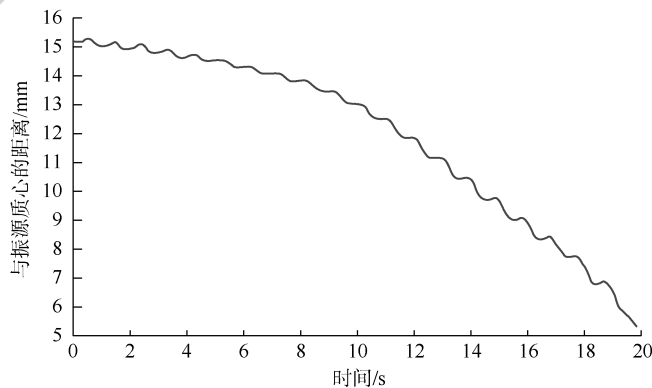


图8 浮子正对六棱柱体棱边时被吸引

吸引和正对柱面时被排斥的结果。

## 2.4 圆柱体振源

图9显示圆柱体在水面浅表振动对浮子有排斥作用,实验中没有观察到振源对浮子的定向吸引。

根据实验结果,三棱柱体、四棱柱体、六棱柱体振源振动时,正对棱边放置的浮子被吸引的平均速度分别为3.86 mm/s、3.08 mm/s和0.45 mm/s。这说明棱柱体的棱角越尖锐,对正对棱边的浮子的吸引越大,也就是正对棱边方向的表面波具有越强的向振源方向的吸引力。就目前的研究来看,吸引力的大小与振源

## 2.3 六棱柱体振源

图7、图8分别显示了浮子正对六棱柱体棱边时被

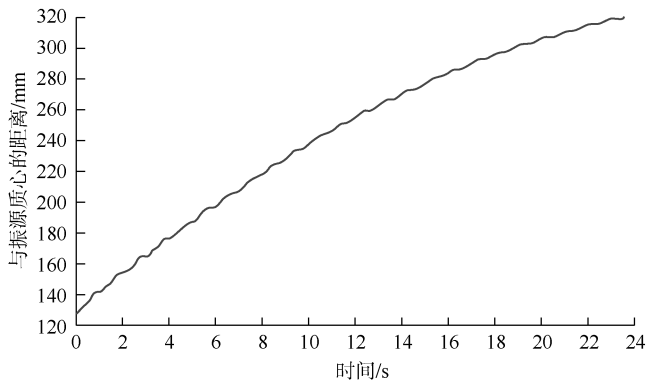


图 9 圆柱形振源对浮子的排斥作用

棱角呈非线性关系。当振源为圆柱体时，棱角的消失导致吸引作用彻底消失。这说明表面波的吸引作用只在振源体有棱角时存在。

### 3 结论

实验发现并验证了振源振动引起的流体表面波的定向吸引作用，这种定向吸引与振源的结构有关。

实验中分别使用了三棱柱体、四棱柱体、六棱柱体及圆柱体作为振源。当振源作低频小幅简谐振动时，正对振源棱边的浮子被吸引，而正对振源柱面的浮子被排斥。吸引力的大小与振源体的棱角呈非线性关系，棱角越小、越尖锐，吸引力越强，棱角消失则吸引力消失。

建议对定向吸引时浮子的位移、速度与振源体结构、振动频率和幅度以及浮子尺度等的关系进行进一步研究。研究成果的应用可能在很大程度上减少传统打捞工作的难度，并为水面污染物清理、处理海上石油泄漏等提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZOU Zhili. Water wave theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 孙涛, 陶建华. 波浪作用下近岸区污染物输移扩散的数学模型及其实验验证[J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 1-9.  
SUN Tao, TAO Jianhua. Numerical modeling and experimental verification of pollutant transport under waves in the near shore

- zone[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(3): 1-9.
- [3] KENNEDY A B, KIRBY J T, GOBBI M F. Simplified higher-order boussinesq equations: I. Linear simplifications[J]. Coastal Eng., 2002, 44(3): 205-229.
- [4] 戴遗山, 段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
DAI Yishan, DUAN Wenyang. Potential flow theory of ship motion in waves[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
- [5] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.  
TAO Jianhua. Numerical simulation of water waves[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [6] PUNZMANN H, FRANCOIS N, XIA H, et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves[J]. Nature Physics, 2014, 10(8): 658-663.
- [7] LIN P, LI C W. A  $\sigma$ -coordinate three-dimensional numerical model for free surface wave propagation[J]. International Journal Methods in Fluids, 2002, 38(11): 1045-1068.
- [8] ZOU Zhili, WANG Tao, ZHANG Xiaoli, et al. One-dimensional numerical models of higher-order Boussinesq equations with high dispersion accuracy[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 22(2): 287-300.
- [9] YASUKAWA H. Application of a 3-D time domain panel models in seakeeping problems[C]//Proc. of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics. Fukuoka, Japan: U.S. Office of Naval Research, 2002.
- [10] HUANG C J, DONG C M. On the interaction of a solitary wave and a submerged dike[J]. Coastal Eng., 2001, 43: 265-286.
- [11] TAO Jianhua, HAN Guang. Effects of water wave motion on pollutant transport in shallow coastal water[J]. Science in China, Series E, 2002, 45(6): 593-605.

第一作者简介: 杨虹 (1965-), 女, 江西上饶人, 硕士, 北京信息科技大学副教授, 主要从事大学物理实验教学及传感设计研究工作。地址: 北京市海淀区清河小营东路 12 号, 北京信息科技大学清河小营校区理学院, 邮政编码: 100101. E-mail: yyanghong@yeah.net

联系作者: 毛东风 (1962-), 女, 河北石家庄人, 中国石油大学 (北京) 机械与储运工程学院教授, 主要从事海洋油气结构工程、海洋油气安全、管柱力学、流固耦合等方面的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 中国石油大学 (北京) 机械与储运工程学院, 邮政编码: 102249. E-mail: maodf@cup.edu.cn

收稿日期: 2015-11-29 修回日期: 2016-06-15

(编辑 胡苇玮)